



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire

ASPOF M Oleksandr Peretyatko

Simulador de Vela Radio Controlada

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de marinha**



**Alfeite
2021**



ESCOLA NAVAL

l'antique & le moderne




ASPOF M Oleksandr Peretyatko

Simulador de Vela Radio Controlada

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, com
especialização em marinha**

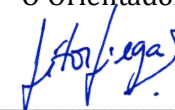
Orientação de: Professor Doutor Vítor Rodrigues Viegas

O Aluno Mestrando



Oleksandr Peretyatko

O Orientador



Vítor Viegas

Alfeite

2021

RESUMO

Elaboração do simulador de vela radio controlada

A vela radio controlada tem se tornado cada vez mais popular como desporto. A sua prática nem sempre é possível devido ao mau tempo. Portanto uma das soluções é fazer um simulador que simule o comportamento de um veleiro radio controlado. Com o avançar da tecnologia é cada vez mais comum aprender vela num ambiente simulado e só depois passara à prática. Neste sentido o objetivo desta dissertação de mestrado é construir um simulado de vela radio controlada. Inicialmente será realizado um estudo dos simuladores de vela existentes no mercado bem como a teoria da vela. Será também estudado um modelo matemático que melhor simula o comportamento de um veleiro e que seja de fácil implementação em código. Seguidamente será construído o simulador numa das mais populares plataformas de criação de *software*. Por fim será feita uma avaliação do simulador bem como as conclusões retiradas do trabalho.

Palavras Chave: [Vela Radio Controlada – Simulador – Programação – *Unity* - Veleiro]

ABSTRACT

Elaboration of the radio-controlled sailboat simulator

Radio controlled sailing has become increasingly popular as a sport. It's practice is not always possible due to bad weather. One of the solutions is to make a simulator that simulates the behavior of a radio-controlled sailboat. With the advance of technology, it is increasingly common to learn sailing in a simulated environment and only then start to practice. In this sense, the objective of this master's dissertation is to build a simulated radio-controlled sailboat. Initially a study of the existing sailboats simulators on the market will be carried out as well as the sailing theory. A mathematical model that better simulates the behavior of a sailboat and that is easy to implement in programming code will also be studied. Then the simulator will be built on one of the most popular software creation platforms. Finally, an evaluation of the simulator will be made, as well as the conclusions.

Keywords: [Radio-controlled sailboat – Simulator – Programming – *Unity* - Sailboat]

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1. CONSCIÊNCIA DO PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1. METODOLOGIA | 3 |
| 2. DEFINIÇÃO DOS RESULTADOS ESPERADOS..... | 5 |
| 2.1. ESTADO DA ARTE | 6 |
| 2.1.1. <i>Sail Simulator</i> | 7 |
| 2.1.2. <i>eSail</i> | 8 |
| 2.1.3. <i>Sailaway II</i> | 10 |
| 2.2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO | 12 |
| 2.2.1. <i>Mareação</i> | 12 |
| 2.2.2. <i>Terminologia do veleiro</i> | 13 |
| 2.2.3. <i>Vento verdadeiro e vento aparente</i> | 14 |
| 2.3. RESULTADOS ESPERADOS..... | 15 |
| 2.4. CARACTERÍSTICAS DO VELEIRO RC | 17 |
| 2.5. MODELO MATEMÁTICO..... | 18 |
| 3. DESENVOLVIMENTO | 25 |
| 4. AVALIAÇÃO..... | 31 |
| CONCLUSÃO..... | 33 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 35 |
| ANEXOS..... | 40 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Símbolo do Unity | 5 |
| Figura 2 Ambiente principal do UNITY | 6 |
| Figura 3 Ambiente do Sail Simulator | 8 |
| Figura 4 Áreas para fundear | 10 |
| Figura 5 Mareação..... | 13 |
| Figura 6 Terminologia do veleiro | 14 |
| Figura 7 Cálculo do vento verdadeiro | 15 |
| Figura 8 Esquema das variáveis de entrada..... | 16 |
| Figura 9 Catamaran RC utilizado para a recolha de dados experimentais | 17 |
| Figura 10 Posição do catamaran em ralação ao referencial do mundo | 19 |
| Figura 11 Relação entre os três vetores..... | 20 |
| Figura 12 OPTOFORCE OMD-20-FG-100N 3D | 21 |
| Figura 13 Diagrama polar da componente F_x | 22 |
| Figura 14 Diagrama polar da componente F_y | 22 |
| Figura 15 Forças F_x e F_y aplicadas no mastro | 23 |
| Figura 16 Catamaran no ambiente de jogo..... | 26 |
| Figura 17 Esquematização do modelo | 29 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Dimensões do catamaran RC..... | 18 |
|---|----|

Introdução

A Escola Naval é uma instituição de ensino superior que tem como missão principal a formação de futuros oficiais de Marinha. Além de ser militar, o oficial de Marinha é também marinheiro e para tal a Escola Naval proporciona-lhe formação nas áreas de marinharia e vela. A Escola Naval está interligada com o Clube Náutico de Oficiais e Cadetes da Armada, conhecido como CNOCA, no que toca à vertente prática das aulas de vela. CNOCA fornece veleiros e palamenta para que os cadetes, alunos da Escola Naval, possam colocar em prática o conhecimento teórico que adquiriram nas aulas de marinharia e vela. Para além das aulas anteriormente referidas existe na Escola Naval a secção de vela com o propósito de aprofundar ainda mais os conhecimentos na área da vela e permitir aos cadetes a participação em regatas onde os cadetes podem competir entre eles e com outros clubes de vela civis.

A vela Radio Controlada (RC) é uma vertente da vela e um desporto que consiste em manobrar remotamente uma miniatura de um veleiro com a ajuda de um comando. Como na vela, para manobrar um veleiro RC, é importante ter em conta a direção e a intensidade do vento. Um bom vélico distingue-se pelo eficaz aproveitamento do vento o que se traduz num menor tempo necessário para percorrer uma dada distância.

Recentemente o CNOCA fez a aquisição de alguns veleiros RC de modo a dar a possibilidade aos cadetes de praticar este desporto. Contudo, devido ao reduzido tamanho dos veleiros, a prática deste desporto é condicionada pelo estado do mar e a intensidade do vento. A prática de vela RC é feita na bacia de manobra da Base Naval de Lisboa (BNL). Sobretudo no inverno a prática deste desporto é condicionada pelas condições meteorológicas severas que se verificam na bacia de manobra da BNL.

1. Consciência do problema

A prática da vela RC fica condicionada ou até mesmo impossibilitada devido às condições meteorológicas vigorosas e reduzidos arcos diurnos, sobretudo no inverno. No que respeita a meteorologia, o vento é o fator predominante e é o que mais influencia a prática deste desporto. O vento, que gera a ondulação, não deve ter força superior a 5 na escala de *Beaufort*. A vaga é outra condicionante e não deve ser maior que 2, “mar encrespado”, na escala de *Douglas*; contudo como a bacia de manobra da BNL encontra-se a montante do estuário do rio Tejo o efeito da vaga é pouco significativo. Devido ao seu reduzido tamanho o veleiro RC é ainda mais influenciado pela corrente de maré sendo necessário delimitar zonas onde a influência desta é mínima ou condicionar a prática do desporto ao período do estófo da maré. Os arcos diurnos também têm a sua importância visto que durante a noite a prática é condicionada devido a reduzida visibilidade. Portanto uma situação ótima para a prática desta modalidade é numa bacia sem ondulação nem vaga e sem correntes, por exemplo um lago, com um vento de força inferior a 5, na escala de *Beaufort* e durante os arcos diurnos.

1.1. Metodologia

Design Research ou Design Science Research, metodologia utilizada na elaboração desta dissertação, tem como objetivo o estudo de fenómenos artificiais. “Ciência do Artificial preocupa-se com os fenómenos artificiais criados pelo homem, e que Design Research é um método que pode ajudar a pesquisa para entender esses fenómenos” (Vaishnavi e Kuechler, 2005). Simon (1996) faz a distinção entre a ciência natural e a ciência artificial definindo como ciência natural como um conjunto de conhecimentos sobre uma classe de objetos ou fenómenos do mundo, já a ciência artificial é algo produzido ou inventado pelo homem, do qual sofre intervenções. É necessário explicar também o conceito de artefacto. Para Simon (1996) os artefactos são os resultados

desta metodologia, ou seja, são ferramentas criadas para explicar ou resolver os fenómenos artificiais. Design Research é estruturada em cinco etapas. Estas etapas são a consciência do problema, definição dos resultados esperados, desenvolvimento, avaliação e conclusão. A primeira etapa é a consciência do problema e é caracterizada pela compreensão da “natureza do problema, o contexto, as potencialidades e as limitações para que seja possível compreender o ambiente em que o problema está inserido” (Silva e Costa). Seguidamente é necessário planejar uma solução de modo a resolver o problema. Esta etapa denomina-se como sugestão ou definição dos resultados esperados. Bortolalso (2009) acentua que nesta fase são realizadas proposições imperativas, fundamentais ao estado da arte da teoria, para produzir projetos ou reinventar projetos existentes. A etapa do desenvolvimento caracteriza-se pela concretização da solução. De acordo com Vaishnavi e Kuechler (2005) o artefacto é desenvolvido e implementado nesta fase. Na fase de avaliação do artefacto, Peffers (2004), Vaishnavi e Kuechler (2005) e Manson (2006) explicam que deve ser analisado e testado de acordo com as condições estabelecidas para a validação. A conclusão é caracterizada pelo fim do ciclo de pesquisa.

Tanto a pesquisa efetuada como a estruturação da dissertação de mestrado obedecem a esta metodologia. Portanto este documento é composto pela introdução, as cinco etapas, divididas em cinco capítulos e a conclusão.

2. Definição dos resultados esperados

Uma das soluções encontradas para a resolução do problema foi a criação de um simulador onde o utilizador pode controlar o veleiro RC num ambiente simulado. Este simulador tem como principal objetivo proporcionar ao utilizador uma experiência o mais realista possível do controlo de um veleiro RC. O simulador estará de acordo com as condições meteorológicas favoráveis à prática da modalidade anteriormente mencionadas. O simulador é equiparado a um videojogo e, portanto, a sua elaboração foi feita em *UNITY*, uma das mais populares plataformas de criação de videojogos.

O *UNITY* é uma plataforma polivalente que permite a criação de jogos, animações e cinemáticos para arquitetura, engenharia, e outras disciplinas. Escolheu-se esta plataforma porque é intuitiva para novos utilizadores fazendo com que a aprendizagem seja mais rápida.

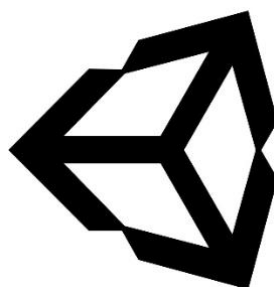


Figura 1- Símbolo do Unity¹

O *UNITY* é essencialmente constituído por um ambiente visual onde o utilizador consegue visualizar o cenário de jogo que está a criar. O cenário é constituído por vários objetos. É possível mudar a cor dos objetos, a textura, a sua forma e mesmo

¹ Fonte: <https://unity.com>

movê-los com o auxílio da linguagem de programação. O *UNITY* utiliza a linguagem de programação *C Sharp*.

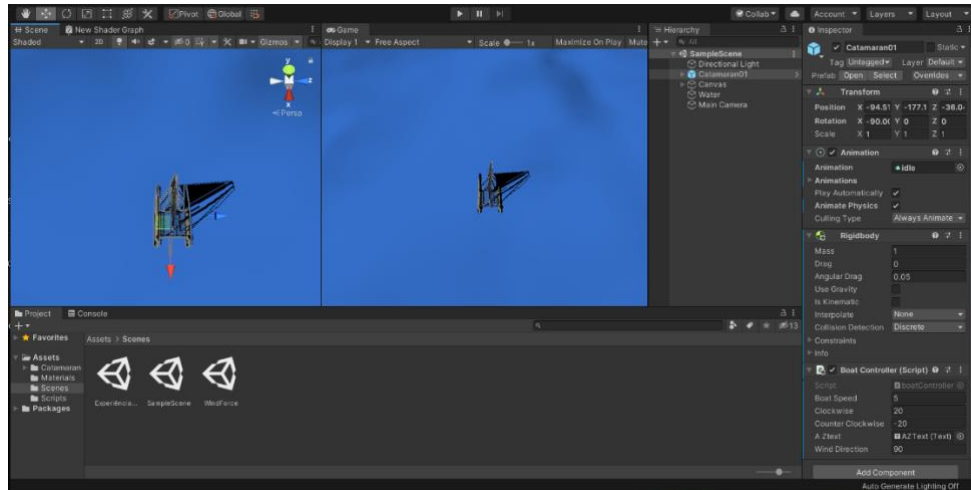


Figura 2 Ambiente principal do UNITY²

2.1. Estado da arte

Devido a inexistência de simuladores de vela RC de qualidade optou-se por fazer o estudo dos simuladores de vela visto que o comportamento de um veleiro se assemelha ao comportamento de um veleiro RC. Neste subcapítulo são descritos três simuladores de vela. Todos eles com objetivos diferentes. O primeiro, Sail Simulator, é focado na competição em regatas de redizída escala. O segundo, eSail, tem como principal objetivo dar formação não só de vela, mas também de arte marinheira e diversas manobras. Por fim, o Sailaway II, com o na competição em regata por equipas em navegação oceânica.

² Fonte: Feito pelo autor

2.1.1. Sail Simulator

O Sail Simulator é um *software* desenvolvido pela equipa *Stentec Navigation*³. O principal objetivo do simulador é a realização de regatas virtuais entre vários jogadores. O utilizador tem a sua disposição uma grande variedade de veleiros, desde os mais pequenos como o Laser até ao Volvo Open 70, veleiro utilizado nas regatas oceânicas *Volvo Ocean Race*. O simulador tem três cenários de navegação, sendo estes:

- Ilhas Cabrera, situadas a 10 milhas náuticas da ilha Maiorca no mar mediterrâneo;
- Ao longo da costa de Scheveningen, Den Haag, Países Baixos;
- Ilhas Koh Hong, na Tailândia;

Como mencionado anteriormente o simulador está desenvolvido para a competição, contudo este tem algumas ferramentas que auxiliam o utilizador na forma como governam o veleiro. Uma das ferramentas é a possibilidade de visualizar o sentido e a intensidade tanto do vento verdadeiro como do vento aparente. A outra é uma carta náutica digital que permite ao utilizador visualizar não só a sua posição, mas também a corrente existente no local.

³ Localizada dos Países Baixos, especializada em hidrodinâmica e aerodinâmica.



Figura 3 Ambiente do Sail Simulator⁴

2.1.2. eSail

Este software foi desenvolvido por uma pequena equipa com experiência nas áreas de desenvolvimento de software, vela e arquitetura naval. O eSail foi desenvolvido com o principal objetivo de proporcionar as ferramentas necessárias para a aprendizagem da arte marinheira, vela e navegação em geral. Para tal o simulador dispõe inúmeros tutoriais tanto básicos como mais avançados. Cada tutorial tem duas componentes, uma teórica e outra prática. Na componente teórica são ministrados cursos teóricos em formato vídeo aula. Nestas o utilizador aprende a nomenclatura do veleiro e termos vélicos, o regulamento internacional para evitar abalroamentos no mar e todas as manobras utilizadas desde a largada de até a

⁴ Fonte: Sail Simulator

atracação. Na componente prática dos tutoriais o utilizador executa, no veleiro, as manobras aprendidas. Durante a execução, o simulador fornece ajudas intuitivas ao utilizador de como executar uma dada manobra. Entre as manobras mencionadas anteriormente destacam-se pela sua importância a manobra de largada/atracação, cambar/arribar, a manobra de fundear e a manobra de homem ao mar.

O cenário onde é feita a navegação é nos arredores das ilhas Shearwater situadas no centro do rifte do oceano Atlântico. Para além dos tutoriais o simulador tem dois modos, o modo de treino e o modo em tempo real. No primeiro, e como o nome indica, o utilizador pode treinar nas condições meteorológicas definidas pelo próprio. Nos vários parâmetros das condições meteorológicas é possível definir nomeadamente o sentido e a direção do vento verdadeiro e a altura e a direção da vaga. O modo em tempo real é o modo mais usual e é nele que se pode aperfeiçoar a arte de velejar. Neste modo é possível simular detalhadamente todo o processo de navegação, como a largada o que compreende a recolha de todas as espas de amarração e o ajuste do velame para afastar do cais ou mesmo cambar ou arribar e ajustar o velame de acordo com o vento.

O veleiro tem integrado um rádio VHF⁵ que serve não só para comunicação com outros jogadores, mas também para a transmissão de avisos meteorológicos. Os avisos meteorológicos são passados de hora em hora e adequam-se às condições meteorológicas observadas no local da navegação. O simulador possibilita também fazer planeamentos de derrotas numa carta náutica através da marcação de pontos nesta. O software tem um foco na aprendizagem, contudo também tem a possibilidade de competir com outros jogadores. A competição é feita em forma de regata. Também estão disponíveis vários desafios para aprimorar as habilidades.

⁵ Very High Frequency, compreende as frequências entre os 30MHz e os 300MHz

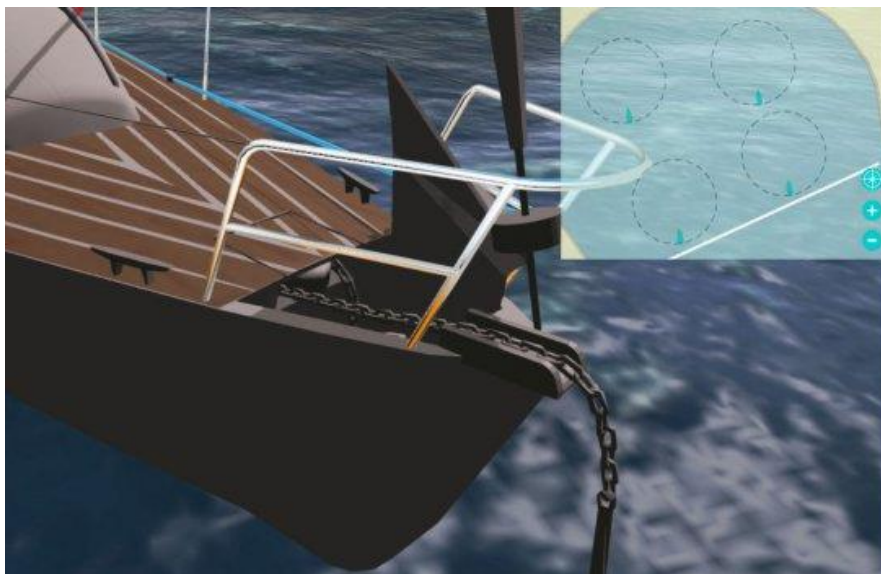


Figura 4 Áreas para fundear⁶

2.1.3. Sailaway II

O simulador *Sailaway II* é desenvolvido em *Unity*, a mesma plataforma utilizada para o desenvolvimento do simulador de vela RC. O *software* continua em desenvolvimento com a ajuda de vários membros da comunidade *Sailaway II* e tem como principal objetivo a competição em forma de regata. É um jogo multijogador e a grande diferença deste simulador para anteriormente mencionados é de ter como cenário de navegação a totalidade do globo terrestre. Portanto o utilizador pode seleccionar qualquer posição do globo para iniciar a sua navegação. A duração do dia no simulador corresponde ao dia real logo, as navegações oceânicas podem demorar semanas ou mesmo meses. Como nem sempre é possível estar no simulador existe uma funcionalidade que permite marcar a derrota na carta náutica que será seguida pelo veleiro em modo auto piloto enquanto o utilizador não se encontra por perto.

⁶ Fonte: eSail

Isto tem maior relevância para regatas oceânicas tomando como exemplo a regata *Volvo Ocean Race*. Existe a possibilidade de criação de regatas de uma escala mais reduzida. Estas competições são criadas pela comunidade de utilizadores de *Sailaway II*. Durante as competições é o próprio simulador que delimita as linhas de partida e de chegada e a respetiva sinalização do percurso a percorrer. As condições meteorológicas são simuladas com base nas previsões feitas pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*⁷ com atualização de 6 em 6 horas. Existe a possibilidade de ser o utilizador a definir as condições meteorológicas. Como se trata de uma plataforma competitiva, os jogadores são colocados em tabelas de classificação consoante os resultados obtidos nas regatas. No que toca a iniciantes estes têm ferramentas visuais que os auxiliam na navegação. O simulador aconselha o melhor rumo e a melhor manobra de modo a aproveitar ao máximo o vento. Para além das ferramentas mencionadas anteriormente o simulador dispõe de vários tutoriais básicos como também tutoriais mais avançados. O relevo e as infraestruturas são carregados da base de dados do *Open Street Map*. O simulador disponibiliza uma panóplia de infraestruturas prefabricadas que podem ser editadas pelo utilizador e serem colocadas no cenário de jogo. No que diz respeito a vegetação esta é colocada automaticamente no jogo através de um algoritmo que utiliza dados satélite e o clima da região. Este software contém todos os astros, sol, lua planetas e estrelas, com a sua posição atualizada o que permite efetuar navegação astronómica. As correntes oceânicas são descarregadas a partir da base de dados OSCAR (*Ocean Surface Current Analysis Real-time*).

⁷ Serviço de previsão meteorológica americano que faz previsões de tempo à escala global.

2.2. Enquadramento teórico

O presente subcapítulo serve para dar a conhecer alguma terminologia utilizada na vela bem como alguns componentes de um veleiro.

2.2.1. Mareação

Mareação é um termo utilizado na vela para designar o ângulo com que o vento incide na vela. Existem vários tipos de mareação:

- **Bolina cerrada** quando o veleiro faz um ângulo de 45° com o vento;
- **Través** quando o veleiro faz um ângulo de 90° com o vento;
- **Bolina folgada**, é uma posição compreendida entre Bolina cerrada e Través, ou seja, quando o veleiro faz um ângulo com o vento compreendido entre 45° e 90° ;
- **Aberto ou de Alheta**, quando o veleiro faz um ângulo de 135° com o vento;
- **Largo**, posição compreendida entre Través e Aberto;
- **Popa arrasada**, quando os veleiros têm o vento a entrar pela popa, ou seja, forma um ângulo de 180° com o vento;
- **Popa**, posição próxima a Popa arrasada.

A mareação aplica-se tanto para um bordo como para outro, ou seja, existe o Través de Bombordo e o Través de Estibordo e assim para o resto das mareações. Para manter uma determinada mareação existem duas maneiras de o fazer, ou aproximar a proa da direção do vento o que na terminologia vélica tem o nome de orçar, ou então afastar a proa da direção do vento que tem o nome de arribar.

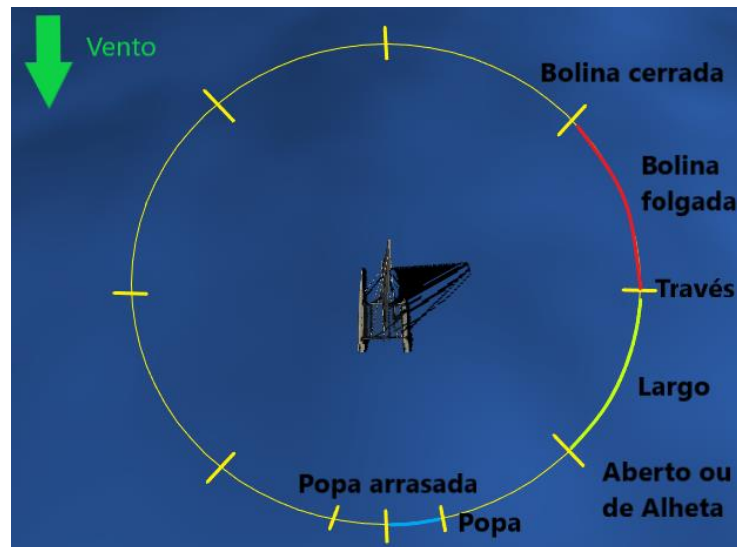


Figura 5 Mareação⁸

2.2.2. Terminologia do veleiro

Um veleiro é constituído por um casco, a estrutura que se encontra em contacto com a água e que assegura a flutuabilidade do veleiro. Sensivelmente ao centro do veleiro está situado o mastro, estrutura alongada que sustenta as velas⁹. A de vante, mais pequena, chamada “genoa”, e a de ré, maior, chamada “vela mestra”. A retranca encontra-se por baixo da vela mestra, orientada no sentido vante-ré com a função de ajudar no suporte da vela mestra. O leme é o componente que se encontra na sua maioria dentro de água e serve para manobrar o veleiro.

⁸ Fonte: Feito pelo autor

⁹ <http://www.poseidon.pt/informacao/termos-nauticos/>

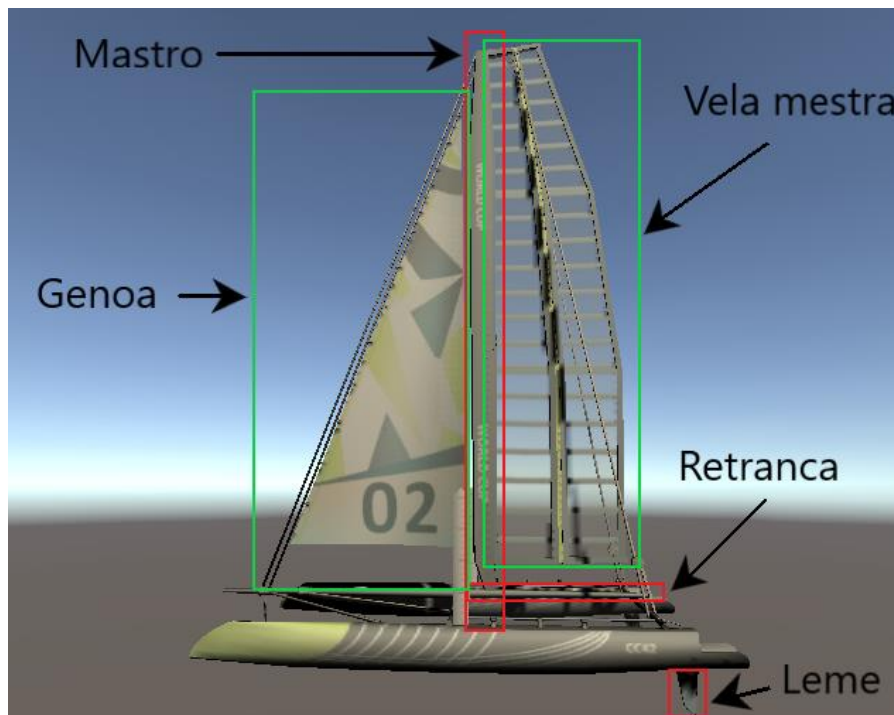


Figura 6 Terminologia do veleiro¹⁰

2.2.3. Vento verdadeiro e vento aparente

Numa estação meteorológica situada em terra o anemómetro indica sempre o vento verdadeiro visto que esta se encontra fixa em terra. Isto já não acontece num veleiro visto que este encontra-se em movimento. Portanto o vento medido pelo anemómetro fixo ao veleiro será sempre vento aparente. O vento verdadeiro calcula-se com uma soma de vetores. Ao vetor BV, que representa a velocidade e o rumo do navio, soma-se o vetor TW, intensidade e direção do vento aparente, obtendo-se o

¹⁰ Fonte: Feito pelo autor

vetor AW, intensidade e direção do vento verdadeiro. A soma de vetores está ilustrada na *figura 7*.

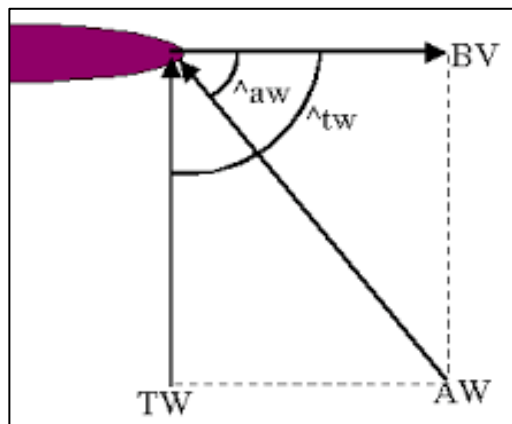


Figura 7 Cálculo do vento verdadeiro¹¹

2.3. Resultados esperados

Para a elaboração do simulador de vela RC foram definidos os resultados que seriam esperados depois da conclusão deste. Estes resultados vão ao encontro das condições meteorológicas ideais para a prática da vela RC. Portanto o primeiro requisito é a programação de uma superfície lisa a simular uma bacia de água com dimensões razoáveis para uma liberdade de manobra com o veleiro RC. Depois disto é esperado haver a simulação do vento de uma direção predominante e com uma determinada força. O utilizador poderá definir a direção do vento e a sua intensidade no início de cada simulação. No que diz respeito ao veleiro, este terá que ter duas variáveis que poderão ser controladas pelo utilizador. Essas variáveis são os graus de leme, onde o utilizador pode alterar os graus de leme tanto para um bombordo como para estibordo, fazendo com que o veleiro mude de direção. A outra variável é a

¹¹ Fonte: www.support.garmin.com

alteração da mareação, ou seja, “movimentar” a vela em relação ao casco do veleiro, de maneira a aproveitar melhor o vento.

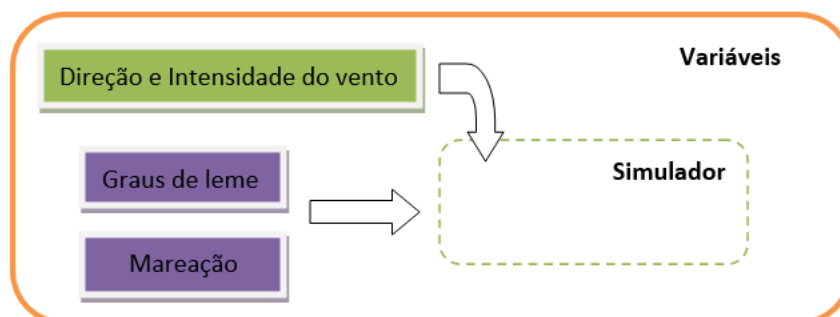


Figura 8 Esquema das variáveis de entrada¹²

Estando as variáveis definidas, para uma simulação mais próxima da realidade, o simulador carece de um modelo matemático que descreva a interação de todas as forças aplicadas ao veleiro. A escolha do modelo matemático regeu-se de acordo com os seguintes critérios, grau de complexidade, adequação com as dimensões de um veleiro RC e a existência de dados experimentais. Em primeiro lugar é necessário que o modelo matemático equacione as interações físicas entre o veleiro e o vento fielmente, contudo tem de ser simples o necessário para ser implementado em código de programação. O modelo tem de ter aplicabilidade no veleiro, tendo em conta as suas dimensões. Por fim é necessário existir valores medidos e retirados experimentalmente, tendo em conta as dimensões do veleiro RC, para serem inseridos no modelo matemático.

Para este propósito foi escolhido o modelo matemático descrito em (Strömbeck, 2017). O modelo em questão cumpre todas as condições impostas anteriormente, uma vez que descreve fielmente as interações físicas das forças aplicadas no veleiro, o

¹² Fonte: Autor

modelo é simples de implementar em código, e sobretudo apresenta dados experimentais de um veleiro RC real.

2.4. Características do veleiro RC

O veleiro utilizado por Carl Strömbeck é um catamaran RC de duas velas, vela mestra e genoa. O veleiro é sustentado por dois cascos de plástico, cada um com um leme e a estrutura que os liga e suporta o mastro também feita de plástico. O mastro é feito em fibra. O deslocamento do veleiro é 360g. As características do catamaran estão pormenorizadas na *Tabela 1*.



Figura 9 Catamaran RC utilizado para a recolha de dados experimentais¹³

¹³ Fonte: Carl Strömbeck

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---|-------|---------|
| Comprimento | 400 | mm |
| Boca | 255 | mm |
| Altura do mastro | 565 | mm |
| Altura total (da quilha à extremidade do mastro) | 710 | mm |
| Peso total | 360 | g |
| Área da vela Genoa | 2,6 | dm |
| Área da vela Mestra | 5,3 | dm |

Tabela 1 Dimensões do catamaran RC¹⁴

2.5. Modelo Matemático

O modelo matemático tem como propósito explicar a interação de todas as forças aplicadas ao veleiro e as suas resultantes, tornando assim as simulações as mais próximas da realidade. Um modelo que explica exatamente a o comportamento do veleiro acaba por ser bastante complexo. Portanto este pode ser simplificado de 6 *Degree of Freedom* (DoF) para 3 DoF tendo em conta que o movimento vertical do veleiro pode ser negligenciado bem como o seu balanço e o seu cabeceio. O modelo de 3 DoF foi desenvolvido por (Jaulin and Bars, 2013) e usado como referência por

¹⁴ Fonte: Carl Strömbeck

(Strömbeck, 2017). Por fim este modelo foi adaptado pelo autor de modo a ser inserido num código de linguagem de programação.

Neste modelo estão presentes três referências distintos que têm de ser tidos em conta. O referencial do mundo, o referencial do veleiro e o referencial da vela.

O referencial do mundo é o referencial principal, relativas ao qual são retiradas as posições do veleiro. O azimuth do catamaran é dado pelo θ e começa no eixo dos x com o valor de zero graus.

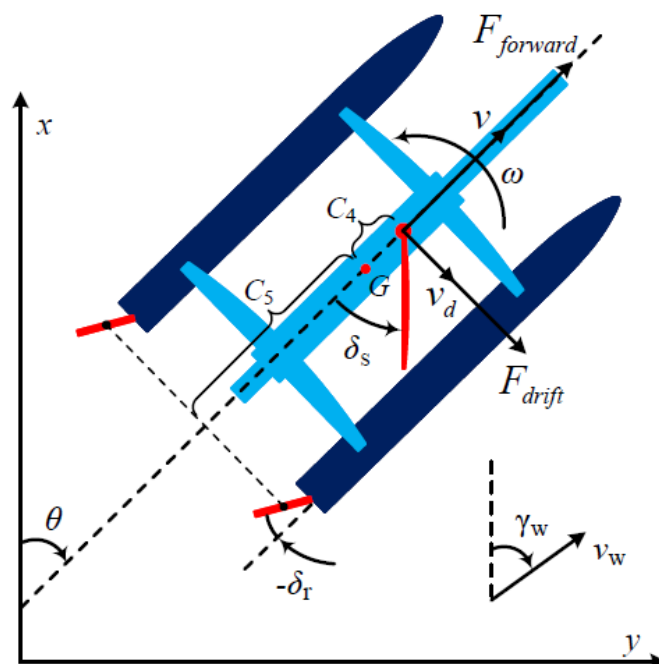


Figura 10 Posição do catamaran em relação ao referencial do mundo¹⁵

O referencial do veleiro localiza-se no centro de massa do catamaran. Serve como referencial base para os ângulos de leme e ângulos de vela.

¹⁵ Fonte: Carl Strömbeck

O referencial da vela serve como base para referenciação dos ângulos do vento aparente. A equação (3.5) faz a conversão das coordenadas do referencial do mundo para as coordenadas do referencial da vela.

Para começar calcula-se a intensidade e direção do vento aparente. Para tal são necessários os valores da velocidade do vento verdadeiro e a sua direção bem como o rumo e a velocidade do veleiro. A relação dos três vetores é ilustrada na *Figura 7*.

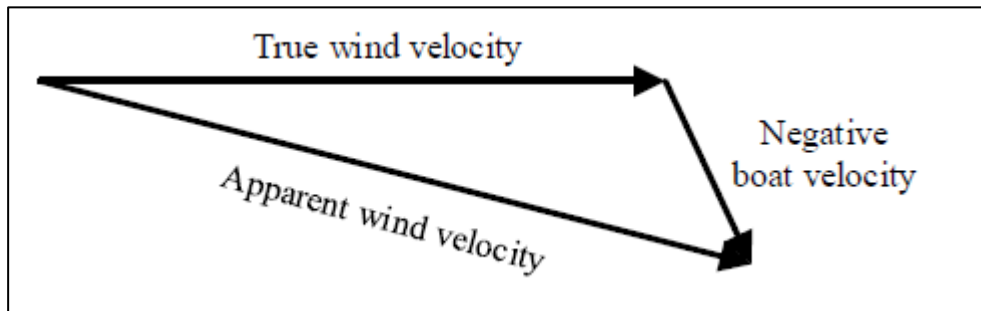


Figura 11 Relação entre os três vetores¹⁶

Faz-se a transformação dos vetores do veleiro e vento aparente em coordenadas polares ilustrados nas equações (3.1) e (3.2). Onde V_x e V_y são os vetores das velocidades do veleiro decompostas em x e em y respetivamente, V_{vx} e V_{vy} são os vetores das velocidades do vento decompostas em x e em y respetivamente.

$$V_x = V \cdot \cos(\psi) \quad V_y = V \cdot \sin(\psi) \quad (3.1)$$

$$V_{vx} = V_v \cdot \cos(\psi_v) \quad V_{vy} = V_v \cdot \sin(\psi_v) \quad (3.2)$$

Seguidamente calcula-se o vetor do vento aparente (3.3) e (3.4), onde $V_{\omega x}$ e $V_{\omega y}$ são os vetores das velocidades do vento aparente decompostas em x e em y respetivamente, V_{ω} a velocidade do vento aparente e φ_v a sua direção.

¹⁶ Fonte: Carl Strömbeck

$$\begin{cases} V\omega x = Vvx - Vx \\ V\omega y = Vvy - Vy \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} V\omega = \sqrt{(V\omega x)^2 + (V\omega y)^2} \\ \psi\omega = \tanh\left(\frac{Vvy}{Vvx}\right) \end{cases} \quad (3.4)$$

O valor de direção do vento aparente (ψv) é referente ao referencial do mundo. Como os valores experimentais foram retirados em relação às coordenadas da vela é necessário traduzir o valor da direção do vento aparente para o referencial da vela (3.5). Onde δs é o ângulo da vela e θ é o ângulo em relação ao eixo dos X.

$$\alpha = \varphi\omega - (\theta + 180 - \delta s) \quad (3.5)$$

O ângulo obtido é utilizado como valor de entrada nos diagramas polares obtidos experimentalmente por (Strömbeck, 2017). Os diagramas relacionam o ângulo de entrada do vento na vela com a força exercida no mastro do catamaran. Estas experiências foram feitas com o auxílio do sensor de força (*OPTOFORCE OMD-20-FG-100N 3D*) preso à base do pé do mastro. Pela análise dos dois diagramas polares equacionou-se as equações (3.6) e (3.7). Onde F_x e F_y são a força exercida no pé do mastro decomposta em x e em y respetivamente. A medição das forças é feita no mastro visto que é onde esta tem maior intensidade. A força exercida nas velas tem uma proporção muito menor podendo ser desprezada. É importante de referir que estas forças são aplicadas ao referencial do veleiro.

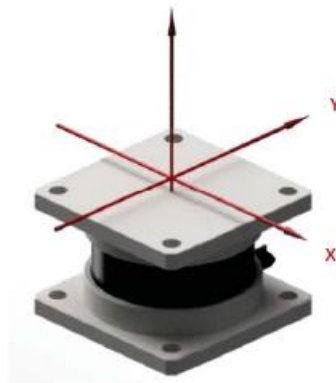


Figura 12 OPTOFORCE OMD-20-FG-100N 3D

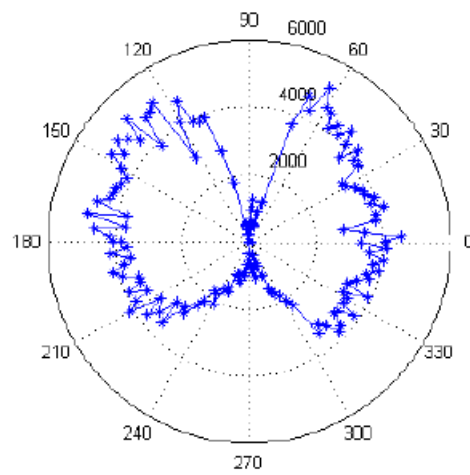


Figura 13 Diagrama polar da componente F_x ¹⁷

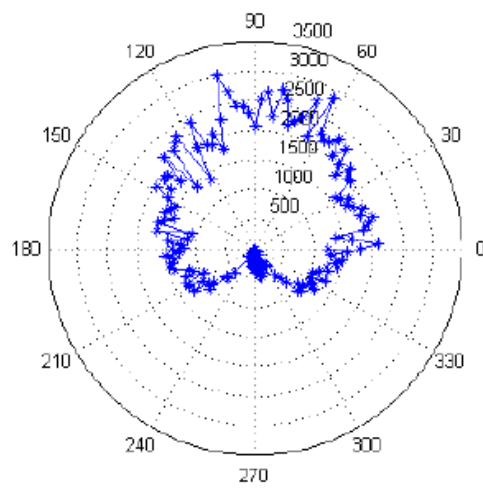


Figura 14 Diagrama polar da componente F_y ¹⁸

¹⁷ Fonte: Carl Strömbeck

¹⁸ Fonte: Carl Strömbeck

$$F_x = \begin{cases} 1,25 \cdot V\omega^2 & \text{para } \alpha \in [-60; 60] \cup [120; 240] \\ 0 & \text{para } \alpha \in]60; 120[\cup]240; 300[\end{cases} \quad (3.6)$$

$$F_y = \begin{cases} 0,625 \cdot V\omega^2 & \text{para } \alpha \in [-30; 210] \\ 0 & \text{para } \alpha \in]210; 330[\end{cases} \quad (3.7)$$

F_x e F_y são as forças que influenciam a velocidade do veleiro tanto na componente longitudinal como na componente transversal. Onde F_f é a força responsável pela movimentação longitudinal do catamaran e F_d pela movimentação transversal, ou seja, pelo abatimento¹⁹ deste (3.8).

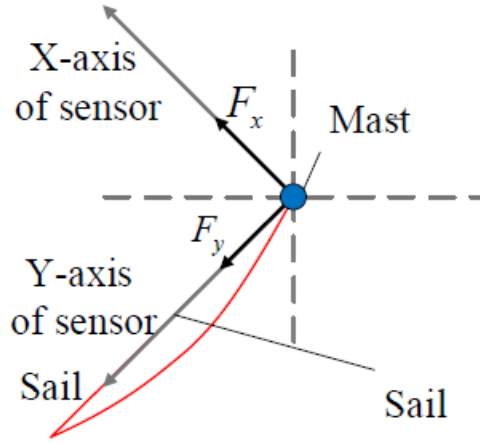


Figura 15 Forças F_x e F_y aplicadas no mastro²⁰

$$\begin{cases} F_f = -F_y \cdot \cos(\delta s) - F_x \cdot \sin(\delta s) \\ F_d = -F_y \cdot \sin(\delta s) - F_x \cdot \cos(\delta s) \end{cases} \quad (3.8)$$

Com a ajuda das forças longitudinal e transversal calcula-se a velocidade do veleiro para cada uma das forças. Onde δr são os ângulos de leme, V_f e V_d são as

¹⁹ Desvio do rumo base provocado pelo vento e pela corrente

²⁰ Fonte: (Strömbeck, 2017)

velocidades para as componentes longitudinais e transversais respetivamente e C1, C2 e C3 são constantes experimentais de desaceleração longitudinal, desaceleração associada ao leme e desaceleração transversal respetivamente, que constam no *anexo A*.

$$\begin{cases} \dot{V}f = \frac{Ff - C1 \cdot Vf - C2 \cdot |\sin(\delta r)| \cdot Vf}{M} \\ \dot{V}d = \frac{Fd - C3 \cdot Vd}{M} \end{cases} \quad (3.9)$$

O ângulo de rotação do veleiro (θ) sobre si próprio é dado pelo simétrico da velocidade rotação do catamaran sobre si mesmo (ω) (3.10). Onde os parâmetros não experimentais são:

- C4 - o deslocamento do mastro;
- C5 - o deslocamento do leme;
- J - Momento de inércia do catamaran.

Os parâmetros determinados experimentalmente são:

- C6 - Constante associada à força do leme;
- C7 – Constante de desaceleração angular.

Os valores das constantes encontram-se no *anexo A*.

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{-C6 \cdot C5 \cdot Vf^2 \cdot \sin(\delta r) \cdot \cos(\delta r) - C4 \cdot Fd - C7 \cdot \omega}{J} \\ \dot{\theta} = -\omega \end{cases} \quad (3.10)$$

Por fim é necessário passar a velocidade e azimuth do catamaran do referencial do veleiro para o referencial do mundo.

$$\begin{cases} Vx = Vf \cdot \cos \theta - Vd \cdot \sin \theta \\ Vy = Vf \cdot \sin \theta - Vd \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} v = \sqrt{Vx^2 + Vy^2} \\ \psi = \tanh \frac{Vy}{Vx} \end{cases} \quad (3.12)$$

3. Desenvolvimento

Neste capítulo é focado na construção do artefacto. Como mencionado anteriormente este foi construído com a ajuda da plataforma de desenvolvimento de *software Unity*. Unity é constituído principalmente por duas janelas nas quais é feita a interação entre o *software* e o programador. Numa das janelas o programador cria e manipula objetos, na outra faz simulações com estes no cenário de jogo. É denominado objeto qualquer figura que for inserida no cenário de jogo. Um objeto pode ser uma simples figura geométrica ou mais complexo como por exemplo um veleiro.

O artefacto é constituído por dois objetos, um plano e o catamaran. O plano tem como objetivo de simular a superfície de água. O efeito da água em movimento é conseguido através da sobreposição de duas texturas de superfícies do oceano em movimento. O gráfico que descreve este movimento encontra-se esquematizado no apêndice B. O objeto catamaran foi adquirido na asset store²¹ em três modelos diferentes. O céu é simulado com a ajuda da textura *sky box*, um conjunto de seis imagens, as seis faces de um cubo e o cenário de jogo encontra-se dentro desse cubo.

²¹ Loja interna do unity que contem diversos objetos à venda.



Figura 16 Catamaran no ambiente de jogo²²

Em Unity os objetos são controlados com o auxílio da linguagem de programação. É através de linhas de código que o programador define o comportamento de um determinado objeto, a sua forma, as suas cores e muito mais. O código que descreve a interação das forças externas e o veleiro e o seu controlo encontra-se no apêndice B. No que diz respeito ao modelo matemático foram feitos ajustes nas equações de modo a permitir traduzi-las em código. As equações que envolvem derivadas (3.9 e 3.10) foram aproximadas as derivadas por diferenças regressivas.

²² Fonte: Autor

Portando tanto a velocidade na componente longitudinal como a velocidade na componente transversal podem ser escritas na seguinte forma:

$$Vf(x) = \left(\frac{T \cdot Ff}{M} \right) + \frac{M - T \cdot C1 - T \cdot C2 \cdot |\sin \delta r|}{M} \cdot Vf(x - 1)$$

$$Vd(x) = \frac{T \cdot Fd}{M} + \frac{M - T \cdot C3}{M} \cdot Vd(x - 1)$$

O mesmo se aplica ao cálculo do ângulo de rotação do veleiro sobre si próprio:

$$\omega(x) = \frac{-T \cdot C6 \cdot C5 \cdot Vf^2(x) \cdot \sin(\delta r) \cos(\delta r) - T \cdot C4 \cdot Fd}{J} + \frac{J - T \cdot C7}{J} \cdot \omega(x - 1)$$

$$\theta(x) = -T \cdot \omega(x) + \theta(x - 1)$$

Este código tem o nome “Controlo do veleiro” e encontra-se na pasta Assets > Catamaran > Script_C. O código é composto principalmente por duas funções:

- Void Start ()
- Void Fixed Update ()

As linhas de código da primeira função são executadas apenas no início do jogo. Já a função “void FixedUpdate” é uma função cíclica com 50 ciclos por segundo. Isto significa que as linhas de código contidas nesta função serão executadas 50 vezes num segundo. O modelo matemático está todo contido nesta função.

As variáveis que deverão ser inicialmente determinadas pelo utilizador são:

- Velocidade do veleiro
- Rumo do veleiro

- Direção do vento verdadeiro
- Intensidade do vento verdadeiro

Os ângulos de leme e de vela estão predefinidos como zero e só se alterarão quando o utilizador impor um comando para tal através do teclado do computador. Estas são as variáveis necessárias para a execução do programa. Com estas informações o programa calcula a direção e a intensidade do vento aparente no referencial do mundo que por sua vez serão passadas para o referencial da vela. Seguidamente serão calculadas as forças F_x e F_y , como está descrito no modelo matemático, e por sua vez F_f e F_d . As duas forças responsáveis pela deslocação do veleiro irão ser usadas pelas equações aproximadas por diferenças regressivas obtendo-se assim as velocidades na componente transversal e na componente longitudinal.

Caso se verificar uma alteração do ângulo de leme um novo ângulo de rotação do veleiro sobre si próprio será calculado pela aproximação as derivadas por diferenças regressivas. Caso contrário este valor irá manter-se inalterado. Por fim os valores das velocidades bem como o rumo do veleiro são traduzidos de novo para o referencial do mundo. Obtendo-se assim um novo rumo e velocidade que irão entrar na próxima iteração repetindo-se assim o ciclo com os novos valores. Na *Figura 17* está esquematizado todo o processo descrito anteriormente.

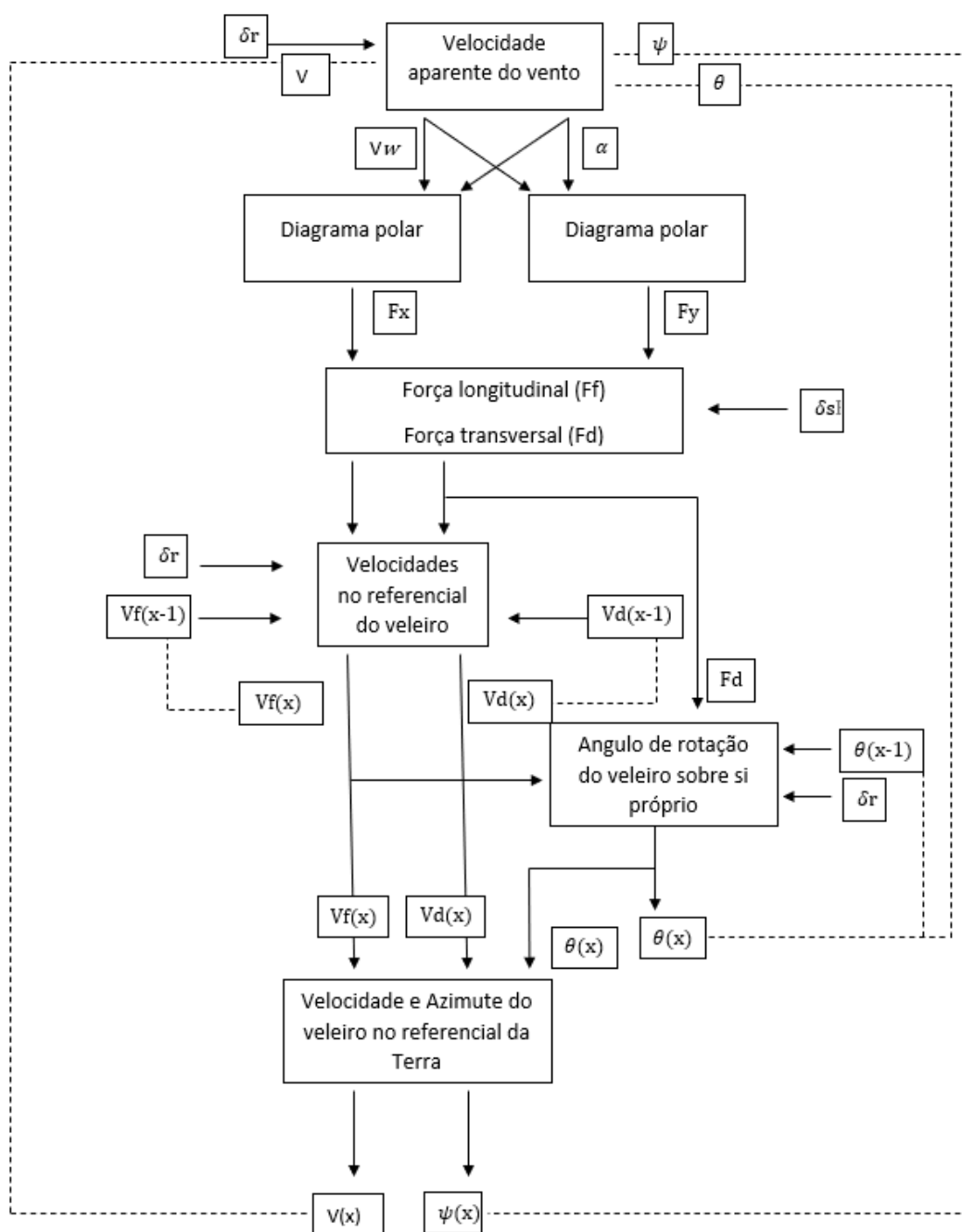


Figura 17 Esquematização do modelo²³

²³ Autor

4. Avaliação

Neste capítulo é feita a avaliação do simulador. Depois de uma avaliação geral o simulador considera-se inacabado visto que apresenta alguns erros no código que não foram resolvidos. Ao correr a simulação esta apresenta valores para o vento aparento no referencial da vela bastante diferentes dos valores esperados. O mesmo acontece para a determinação das velocidades na componente longitudinal e na componente transversal. Isto faz com que os valores das outras variáveis sejam influenciados apresentando no fim valores impossíveis para o rumo e velocidade do veleiro. O veleiro tem a capacidade de efetuar mudanças de rumo bem como movimentar-se tanto na componente longitudinal como na componente transversal.

Conclusão

A elaboração de um simulador de vela RC foi recebida com muito entusiasmo. Para conseguir construir o simulador foi necessário, de início, aprender a trabalhar com *Unity* e com uma nova linguagem de programação. Para tal foi feito um curso na *Udemy*, plataforma virtual que contem os mais diversos cursos. A aprendizagem foi feita com o auxílio de vídeo aulas práticas. Nestas aulas foi possível fazer o desenvolvimento de um pequeno videojogo. Durante a fase de desenvolvimento foram sentidas algumas dificuldades como por exemplo perceber as características mais importantes num simulador para que este simule o comportamento de um veleiro o mais próximo de realidade. Foram sentidas dificuldades na programação acabando a maior parte delas ultrapassadas.

O simulador encontra-se inacabado, contudo é um ponto de partida para um eventual aperfeiçoamento. Quando acabado poderá servir como ferramenta para testar algoritmos de otimização de trajetória pra veleiros não tripulados.

Referências Bibliográficas

- eSail. (4 de julho de 2021). *eSail Simulador de vela*. Obtido de eSail: <https://www.esailyachtsimulator.com/pt/>
- Juliana da Costa, R. d. (15 de março de 2021). *Redpilares*. Obtido de Redpilares: http://www.redpilares.net/sobre-la-red/Documents/SILVA_COSTA_DESIGN%20RESEARCH%20É%20UMA%20METODOLOGIA%20DE%20APLICAÇÃO%20PRÁTICA.pdf
- Sailaway. (15 de julho de 2021). *Sailaway*. Obtido de Sailaway: <https://sailaway.world>
- Stentec Navigation. (15 de julho de 2021). *SailSimulator*. Obtido de SailSimulator: <https://www.sailsimulator.com>
- Strömbeck, C. (2017). *Modeling, Control and Optimal Trajectory Determination for an Autonomous Sailboat*. Lund, Automatic Control. Suécia: Tryckeriet i E-huset.
- Udemy. (2 de outubro de 2020). *Udemy*. Obtido de Udemy: <https://www.udemy.com/share/103iws3@rK-df3CcIxcMTXXxCZxx4IpdXawNXCbWenSaXqa5IhNGvv9NHDZ-sCCwW3KRMiJO2A==/>
- Unity. (3 de fevereiro de 2021). *Unity*. Obtido de Unity: <https://unity.com>
- Unity User Manual. (1 de março de 2021). *Unity Documentation*. Obtido de Unity: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>

Apêndices

Apêndice A- Código de programação

A.1 - Código de programação para controlo do veleiro

```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4
5 0 references
6 public class Testagem : MonoBehaviour
7 {
8     1 reference
9     float clockwise = 20.0f;
10    1 reference
11    float counterClockwise = -20.0f;
12    4 references
13    public float V_Veleiro; //Velocidade do veleiro
14    5 references
15    float Vx_Veleiro;
16    5 references
17    float Vy_Veleiro;
18    2 references
19    public float V_VentoVerdadeiro; // Velocidade do vento verdadeiro
20    2 references
21    float Vx_VentoVerdadeiro;
22    2 references
23    float Vy_VentoVerdadeiro;
24
25    20 references
26    public float angVeleiro; //Az do veleiro
27    17 references
28    public float angVento; // Direção do vento
29    3 references
30    float angVela=0; //Ângulo da vela
31
32    1 reference
33    public float angLeme; //Ângulo de leme
34    2 references
35    float Ffrente;
36    3 references
37    float Fabatimento;
38    5 references
39    float Fx;
40    5 references
41    float Fy;
42
43    5 references
44    float Vfrente;
45    4 references
46    float Vabatimento;
47    0 references
48    float angAparentevela;
49    3 references
50    float w;
51    0 references
52    float angVentoRelativoDGR;
```

```
35 // Start is called before the first frame update
```

```
0 references
```

```
void Start()
```

```
{
```

```
    if (angVento > 180)
```

```
    {
```

```
        angVento=angVento-180;
```

```
    }
```

```
    else if (angVento <= 180)
```

```
    {
```

```
        angVento=angVento +180;
```

```
    }
```

```
    //Conversão para RAD
```

```
    angVeleiro=(angVeleiro*Mathf.PI)/180;
```

```
    angVento=(angVento*Mathf.PI)/180;
```

```
}
```

```
36 // Update is called once per frame
```

```
0 references
```

```
void Update()
```

```
{
```

```
    //Rodar no sentido horário
```

```
    if(Input.GetKey(KeyCode.E))
```

```
    {
```

```
        transform.Rotate(0, 0, Time.deltaTime * clockwise);
```

```
    }
```

```
    //Rodar no sentido horário
```

```
    }
```

```
    else if(Input.GetKey(KeyCode.Q))
```

```
    {
```

```
        transform.Rotate(0, 0, Time.deltaTime * counterClockwise);
```

```
    }
```

```
}
```

```
0 references
```

```
void FixedUpdate()
```

```
{
```

```
    // Decomposição da velocidade do vento verdadeiro em coordenadas polares
```

```
    Vx_Veleiro= V_Veleiro*Mathf.Cos(angVeleiro);
```

```
    Vy_Veleiro= V_Veleiro*Mathf.Sin(angVeleiro);
```

```
    // Decomposição da velocidade do vento verdadeiro em coordenadas polares
```

```
    Vx_VentoVerdadeiro= V_VentoVerdadeiro*Mathf.Cos(angVento);
```

```
    Vy_VentoVerdadeiro= V_VentoVerdadeiro*Mathf.Sin(angVento);
```

```
    //Velocidade do vento relativo decomposta
```

```
    Vx_VentoRelativo= Vx_VentoVerdadeiro-Vx_Veleiro;
```

```
    Vy_VentoRelativo= Vy_VentoVerdadeiro-Vy_Veleiro;
```

```
    //Velocidade do vento relativo
```

```
    V_VentoRelativo= Mathf.Sqrt((Mathf.Pow(Vx_VentoRelativo,2))+(Mathf.Pow(Vy_VentoRelativo,2)));
```

```
    //Az vento relativo
```

```
    angVentoRelativo=Mathf.Atan(Vy_VentoRelativo/Vx_VentoRelativo);
```

```
    //Converção RAD em GR
```

```
    angVentoRelativo= (angVentoRelativo*180)/Mathf.PI;
```

```
    angVeleiro=(angVeleiro*180)/Mathf.PI;
```

```
    angVento= (angVento*180)/Mathf.PI;
```

```

102 //Conversão em base nos diagramas polares
103 if(angVentoRelativo >= -30 && angVentoRelativo <= 0 || angVentoRelativo >= 30)
104 {
105     Fx= 1.25f*Mathf.Pow(V_VentoRelativo,2);
106 }
107 else
108 {
109     Fx= 0f;
110 }
111
112
113 if(angVentoRelativo <= -60 && angVentoRelativo > -90 || angVentoRelativo >= 0)
114 {
115     Fy= 0.625f*Mathf.Pow(V_VentoRelativo,2);
116 }
117 else
118 {
119     Fy= 0;
120 }
121
122
123 Ffrente= (-Fy*Mathf.Cos(angVela))- (Fx*Mathf.Sin(angVela));
124 Fabatimento= (Fy*Mathf.Sin(angVela))- (Fx*Mathf.Cos(angVela));
125
126 // Cálculo da velocidade do veleiro para "frente"(Vf) e abatimento (Vd);
127 Vfrente=(Time.fixedDeltaTime* Ffrente/0.6f)+(((0.6f-(Time.fixedDeltaTime* 1)-(Time.fixedDeltaTime* 1*Mathf.Abs(Mathf.Sin(angLeme)
128 Vabatimento=(Time.fixedDeltaTime* Fabatimento/0.6f)+(((0.6f-(Time.fixedDeltaTime* 80f))/0.6f)*Vabatimento);
129
130 //Debug.Log("Velocidade frente:" + Vfrente);
131 //Debug.Log("Abatimento:" + Vabatimento);

```

```

132
133 // CALCULO ROTAÇÃO VELEIRO SOBRE SI PROPRIO
134 w=((((Time.fixedDeltaTime* 3f*0.2f*Mathf.Pow(Vfrente,2)*Mathf.Sin(angVela)*Mathf.Cos(angVela))-(Time.fixedDeltaTime* 0.03f*Faba
135 angVeleiro= (-Time.fixedDeltaTime* w)+(angVeleiro*180/Mathf.PI);
136 angVeleiro= angVeleiro*Mathf.PI/180;
137
138 Vx_Veleiro= (Vfrente*Mathf.Cos(angVeleiro))- (Vabatimento*Mathf.Sin(angVeleiro));
139 Vy_Veleiro= (Vfrente*Mathf.Sin(angVeleiro))+ (Vabatimento*Mathf.Cos(angVeleiro));
140
141 V_Veleiro=Mathf.Sqrt(Mathf.Pow(Vx_Veleiro,2)+Mathf.Pow(Vy_Veleiro,2));
142 angVeleiro= Mathf.Atan(Vy_Veleiro/Vx_Veleiro);
143
144
145 //Converção RAD para GR
146 angVeleiro=(angVeleiro*Mathf.PI)/180;
147 angVento=(angVento*Mathf.PI)/180;
148
149 Debug.Log("VelocidadeVeleiro=" +V_Veleiro + "Ang VELEIRO="+ angVeleiro + "AngVentoVerdadeiro="+ angVento + "Angulo vento relativo
150
151
152 //Converção GR para RAD
153 angVeleiro=(angVeleiro*180)/Mathf.PI;
154 angVento=(angVento*180)/Mathf.PI;
155
156
157 }
158
159

```

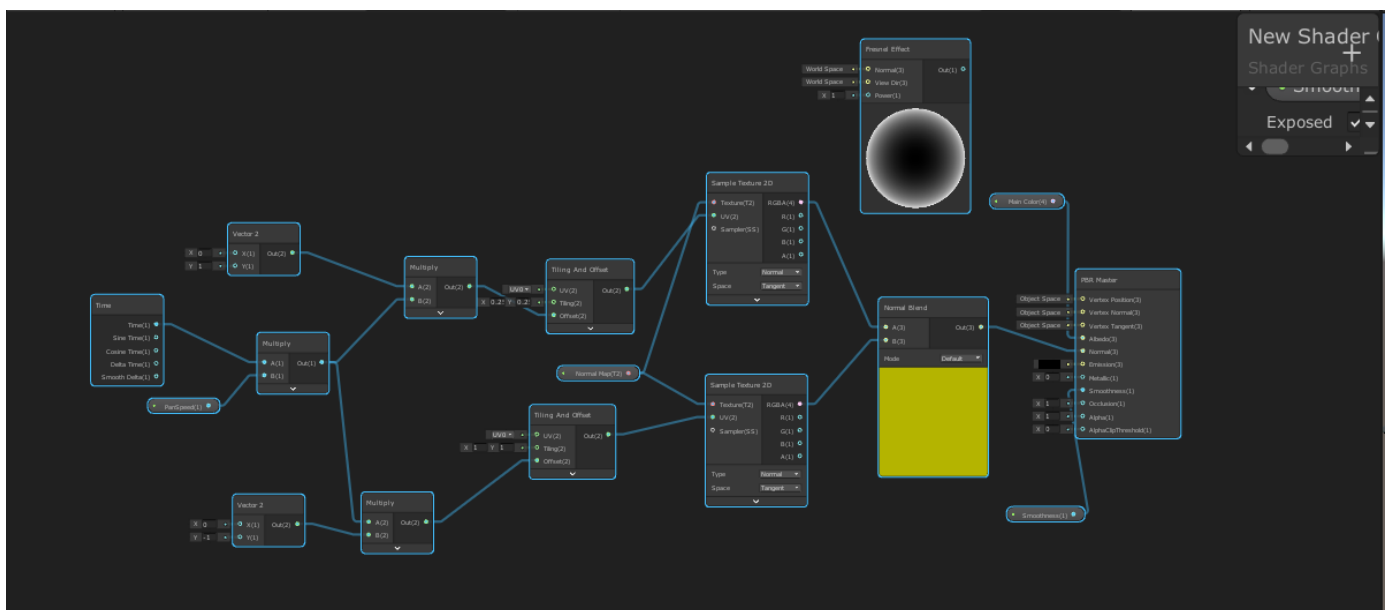
A.2 - Código de programação de fluutuabilidade do veleiro

```

1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3
4 0 references
5 public class Floating : MonoBehaviour
6 {
7     0 references
8     public float angulos_segundo = 15.0f;
9     1 reference
10    public float amplitude = 0.5f;
11    1 reference
12    public float frequencia = 1f;
13
14    // Vetores p/ posição
15    2 references
16    Vector3 posição = new Vector3 ();
17    3 references
18    Vector3 tempPos = new Vector3 ();
19
20    0 references
21    void Start () {
22        // Store the starting position & rotation of the object
23        posição = transform.position;
24    }
25
26    0 references
27    void Update () {
28        // Rotação em torno do eixo dos Y
29        //transform.Rotate(new Vector3(0f, Time.deltaTime * angulos_segundo, 0f), Space.World);
30
31        // Flutuação com a função
32        tempPos = posição;
33        tempPos.y += Mathf.Sin (Time.fixedTime * Mathf.PI * frequencia) * amplitude;
34
35        transform.position = tempPos;
36    }
37 }

```

A.3 - Shader Graph para simulação do espelho de água



Anexos

Anexo A - Tabela de constantes

| Parâmetro | Abreviatura | Valor | Unidades |
|--|-------------|---------------|--------------|
| Massa do veleiro | | 0,6 | kg |
| Momento de inércia | J | 0,0130 | m².kg |
| Constante de desaceleração longitudinal | C1 | 1 | - |
| Constante de desaceleração associada ao leme | C2 | 1 | - |
| Constante e desaceleração transversal | C3 | 80 | - |
| Deslocamento do mastro | C4 | 0,03 | kg |
| Deslocamento dos lemes | C5 | 0.20 | kg |
| Constante associada à força do leme | C6 | 3 | - |
| Constante de desaceleração angular | C7 | 0,005 | - |